doi:10.13866/j.azr.2019.04.21

近 55 a 内蒙古极端降水指数时空变化特征①

春　兰[1]，　秦福莹[1]，　宝　鲁[2]，　那音太[3]，　包玉海[1]，　包山虎[1]
（1. 内蒙古师范大学地理科学学院，内蒙古 呼和浩特　010022；2. 内蒙古自治区发展研究中心，内蒙古 呼和浩特　010098；
3. 内蒙古财经大学资源与环境学院，内蒙古 呼和浩特　010022）

摘　要： 基于内蒙古 100 个气象站点 1960—2014 年日降水数据，选取气候变化监测与指数专家组（ETCCDI）推荐的 9 个极端降水指数，采用 Sen's 斜率法和 Mann-Kendall 非参数统计检验方法以及空间地统计方法，研究了极端降水指数时空演变特征。结果表明：研究区区域平均的全部极端降水指数均呈不同程度的下降趋势，且年际波动显著；分区的年际趋势有所差异，即东部地区潮湿日数（NW）呈增加趋势，其余极端降水指数均呈减少趋势，其中持续干燥指数（CDD）呈显著下降趋势（$P<0.05$）；中部地区所有极端降水指数均呈减少趋势，其中年总降水量（PRCPTOT）减少趋势较明显；西部地区持续湿润指数（CWD）、强降水量（R95）、单日最大降水量（Rx1day）、5 日最大降水量（Rx5day）呈减少趋势，其余指数均呈增加趋势。从极端降水指数变化趋势的空间分布特征来看，区域差异显著，总体上呈下降趋势的站点主要分布于内蒙古东部和中部地区，而呈上升趋势的站点主要分布于内蒙古东北部和西部地区。

关键词： 极端降水；时空分布；Mann-Kendall 检验；变化趋势；内蒙古

在全球变暖背景下，极端气候事件的强度和频率发生了明显变化[1-2]，1961 年以来，我国区域性高温、气象干旱和强降水事件增多[2-4]。内蒙古地区受西风带和东亚季风的共同影响，是内陆干旱、半干旱气候向东南沿海湿润、半湿润季风气候的过渡带，对气候变化的响应尤为敏感[5-6]，极易发生极端气候事件，如极端干旱、暴雪、洪涝、沙尘等。极端气候事件对该地区的农牧业和生态环境造成了严重的影响和损害[7-10]，其预测与防范工作受到相关部门及学者的广泛关注[6-10]。

有关内蒙古极端降水事件的研究已有许多成果[11-22]。白美兰等[11]分析了 1961—2010 年内蒙古极端降水事件变化特征，认为极端降水事件呈明显减少趋势，但极端降雪量呈略微增加趋势；闫慧敏等[12]指出，1959—2008 年极端强降水呈现出一定的下降趋势，且在 1998—2008 年下降显著；刘宏伟等[13]研究指出，1961—2007 年内蒙古地区极端降水事件发生的强度和出现的频次增多，且降水不稳定性增加，降水有极端化发展趋势；刘俊英[14]研究结果表明，年总降水量、降水强度、大雨日数在 20 世纪 90 年代略微增加，极端降水事件有增多趋势，且其空间分布一致性较差；尤莉等[15]指出，1961—2008 年内蒙古区域平均极端降水事件没有显著变化，但年际波动特征明显，1987 年气温显著升高以后，内蒙古中部大部地区和东南部极端降水事件减少，东北部和西部增加；郭明霞等[16]指出，1961—2013 年内蒙古暴雨、大雨和中雨出现的概率略增；李玮等[7]研究指出，内蒙古高原中部内陆河流域极端降水指数呈总体下降趋势，其中连续无雨日数下降的区域占整个流域的 91%；李喜仓等[8]指出，近 20 a（1990—2010 年）内蒙古东部牧区极端降雪量以 $2.1\ mm\cdot(10a)^{-1}$ 的速率显著增加，而中西部地区则以 $-0.12\ mm\cdot(10a)^{-1}$ 的速率略微减少。

综上所述，由于前期研究所选取的研究区域差异和时间尺度不同，且选用的极端降水指数存在差异以及气象站点数目较少，致使内蒙古地区极端降水事件研究结果不尽相同，综合分析缺乏，时空分布细节分析还有待完善。因此，本文依据地域分布特征和气候特征将内蒙古全区分为东、中、西 3 个部分，并基于 100 个具有代表性的气象站点日降水数

① **收稿日期：** 2018-09-25；　**修订日期：** 2018-12-19
基金项目： 国家自然科学基金项目（61661045，61631011）；内蒙古教育厅项目（NJZY17158）；国际合作项目（GJHZ201705）资助
作者简介： 春兰（1993-），女，硕士研究生，研究方向为气候变化研究
通讯作者： 秦福莹. E-mail：nsdqinfuying@163.com

据,选取 9 个极端降水指数,对研究区近 55 a 极端降水指数变化特征及其演变规律进行深入研究。本研究在全面认识内蒙古地区极端降水事件对农、牧、林业的影响方面具有重要指示意义,并可为该地区制定灾害预警和防范等工作提供理论依据。

1 研究区概况

内蒙古位于中国北部边疆,面积 1.18×10^6 km^2,呈东北西南走向,横跨东北、华北、西北 3 个地理单元,经纬度介于 37°24′~53°23′N、97°12′~126°04′E,海拔多在 1 000 m 以上,属于高原型地貌(图 1)。植被类型丰富,从东到西依次为山地针叶林和阔叶林、森林草原、温带草原、荒漠草原和荒漠[13]。内蒙古位于干旱半干旱地区,是气候变化的敏感带,以温带大陆性气候特征为主,气温自东向西增高,年平均气温介于 -4~8 ℃,降水自东向西减少,年总降水量 50~450 mm,且年内分配不均匀,空间异质性明显(图 2)。东部地区大部年降水量 300~500 mm,中部地区 150~400 mm,西部年降水量不足 100 mm,部分地区甚至不足 50 mm[23]。因此,根据内蒙古地域分布特征、气候特征及气象地理分区原则,将全区分为:东部地区(呼伦贝尔、兴安盟、通辽和赤峰)、中部地区(锡林郭勒和乌兰察布)和西部地区(呼和浩特、包头、鄂尔多斯、巴彦淖尔、乌海和阿拉善)[23]。

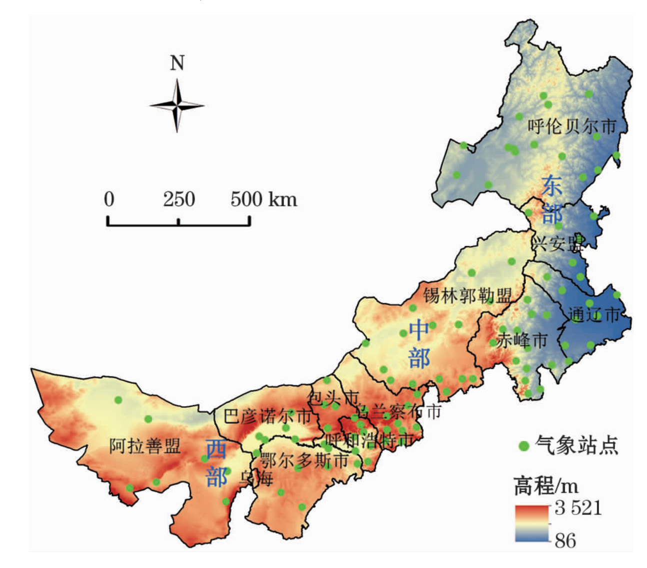


图 1 研究区气象站点分布示意图

Fig. 1 Distribution of the meteorological stations in the study area

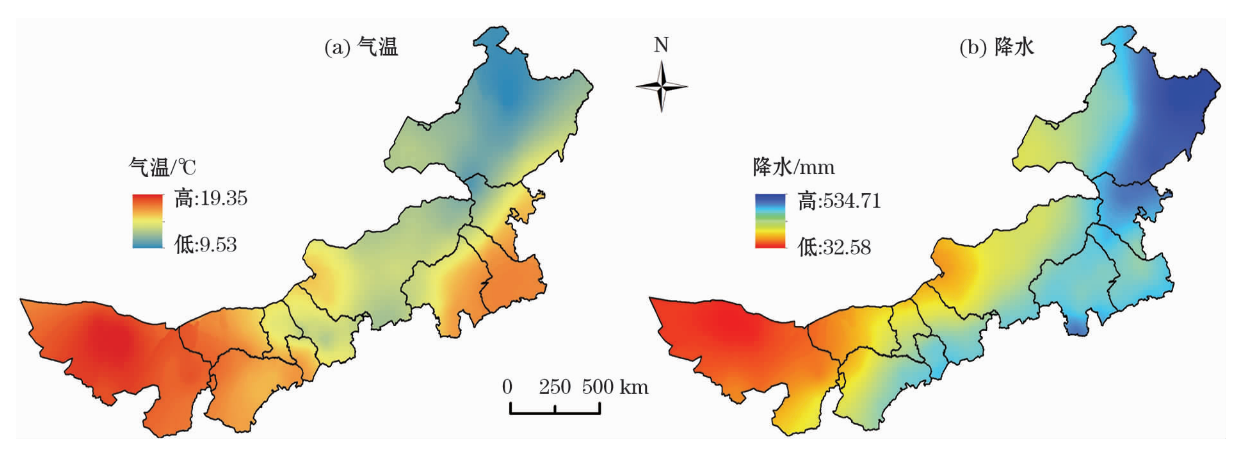


图 2 1960—2014 年内蒙古地区多年平均气温和年降水空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of annual mean temperature and annual precipitation in Inner Mongolia during the period of 1960 - 2014

2 数据来源与研究方法

2.1 数据源

基于气象观测站点的均一性、资料年代的完整性以及较好的代表性等原则,在全区 120 个气象站中选取了 100 个地面气象站点,统计分析 1960—2014 年内蒙古逐日降水数据。为确保气候变化研究的可靠性,也为计算极端降水指数创造条件,本文通过 RClimDex1.0 软件对原始数据进行了质量控制和均匀性评价(http://etccdi.pacificclimate.org)。个别缺测的数据利用插值法进行填补:缺测 1~2 d 数据,用相邻日的数据平均值进行插补;缺测 3 d 以上数据,用同期数据资料的多年平均值进行插补。

2.2 极端降水指数的选取与计算

气候变化监测与指数专家组(ETCCDI)定义了 27 个核心指数,其中包括 11 个极端降水指数(https://www.climdex.org/indices.html)。本文结合研究区水热特征,选取了其中8个极端降水指数以及

表 1　极端降水指数的定义

Tab. 1　Definitions of extreme precipitation indices

代码	极端降水指数	定义	单位
R10	强降水日数	RR≥10 mm 的年统计日数	d
CDD	持续干燥指数	RR < 1 mm 的最长连续日数	d
CWD	持续湿润指数	RR≥1 mm 的最大持续日数	d
R95	强降水量	RR > 第 95 个百分位数的年总降水量	mm
Rx1day	单日最大降水量	月最大 1 d 降水量	mm
Rx5day	5 d 最大降水量	每月内连续 5 d 的最大降水量	mm
SDII	普通日降水强度	年总降水量除以当年的潮湿日数	$mm \cdot d^{-1}$
PRCPTOT	年总降水量	RR≥1 mm 的年累计降水量	mm
NW	潮湿日数	一年内 RR≥1 mm 的日数	d

注：RR 为每日降水量。

潮湿日数，其详细定义见表 1[24]。最后通过 RClim-Dex1.0 软件和 Microsoft Office Excel 2010 进行数据统计分析。

2.3　Mann-Kendall 统计检验法和 Sen's 斜率法

采用 Sen's 斜率法计算降水指数演变趋势，并使用 Mann-Kendall 非参数统计检验方法进行显著性检验，以揭示气候要素演变规律。正值为增趋势，负值为降趋势，趋势在 0.05 水平上则被认为显著[25]。针对极端降水事件的空间差异，利用 ArcGIS 10.2 软件绘制空间分布图。

Mann-Kendall 统计检验法是一种非参数统计检验方法，变量可以不具有正态分布特征，适用于水文变量的趋势检验[26]。假定 $x_1, x_2, \cdots x_n$ 为时间序列变量，n 为时间序列的长度，则 S 定义为如下：

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \operatorname{sgn}(x_j - x_i) \quad (1)$$

其中：

$$\operatorname{sgn}(x_k - x_j) = \begin{cases} 1, & x_k - x_j > 0 \\ 0, & x_k - x_j = 0 \\ -1, & x_k - x_j < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中：x_j, x_k 分别为 j, k 年的相应测量值，且 $k > j$。

$$Z = \begin{cases} \dfrac{S-1}{\sqrt{\operatorname{Var}(s)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \dfrac{S+1}{\sqrt{\operatorname{Var}(s)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中：Z 为一个正态分布的统计量；$\operatorname{Var}(s)$ 为方差。在给定的 α 置信水平上，如果 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$，则拒绝原假设，即在 α 置信水平上，时间序列数据存在明显的上升或下降趋势。其变化趋势的大小用 Sen's 斜率表示，计算公式如下：

$$\text{Sen's 斜率} = \operatorname{Median}\left(\frac{x_k - x_j}{k - j}\right), \quad \forall j < k \quad (4)$$

3　结果分析

3.1　极端降水指数时间变化特征

表 2 为 1960—2014 年 9 个极端降水指数基本统计值，其变异系数介于 7.32% ~26.79%，其中强降水量（R95）变异系数大于 20%，强降水日数（R10）、持续干燥指数（CDD）、单日最大降水量（Rx1day）、5 日最大降水量（Rx5day）和年总降水量（PRCPTOT）的变异系数均在 10% 以上，其余指数变异系数均介于 5% ~10%。研究区区域平均 9 个极端降水指数均呈不同程度的下降趋势（$P > 0.05$），其中 CDD 下降趋势最大，为 $-1.64\ d \cdot (10a)^{-1}$，普通日降水强度（SDII）下降趋势最小，为 $-0.01\ mm \cdot d^{-1} \cdot (10a)^{-1}$（表 2）。

极端降水指数在研究区东中西部差异显著（图 3 和表 3）。内蒙古东部地区有 8 个极端降水指数呈下降趋势，其中 CDD 减少趋势最明显，为 $-3.17\ d \cdot (10a)^{-1}$，呈显著下降趋势（$P < 0.05$）；潮湿日数（NW）呈增加趋势，其趋势为 $0.02\ d \cdot (10a)^{-1}$，说明东部地区 NW 有所增加，持续干燥现象明显减少。内蒙古中部地区 9 个极端降水指数均呈下降趋势，其中 PRCPTOT 减少趋势最明显，为 $-3.34\ mm \cdot (10a)^{-1}$。内蒙古西部地区，持续湿润指数（CWD）、R95、Rx1day 和 Rx5day 呈下降趋势，减少趋势均不

表 2　1960—2014 年内蒙古极端降水指数基本统计值

Tab. 2　Statistic results of extreme precipitation indices in Inner Mongolia during the period of 1960 – 2014

指数	R10/d	CDD/d	CWD/d	R95/mm	Rx1day/mm	Rx5day/mm	SDII/(mm·d^{-1})	PRCPTOT/mm	NW/d
平均值	9.41	94.66	3.95	80.26	41.24	63.19	7.24	315.79	42.42
标准差	1.42	14.63	0.34	21.50	4.92	7.87	0.53	44.63	4.01
β 值	-0.05	-1.64	-0.03	-1.14	-0.23	-0.47	-0.01	-1.68	-0.14
Z_{M-K}值	-0.29	-1.23	-1.44	-0.61	-0.60	-0.55	-0.12	-0.35	-0.36
变异系数/%	15.09	15.46	8.72	26.79	11.93	12.45	7.32	14.13	9.41

注:β 值表示 10 a 增加或减少趋势,Z_{M-K}值为正态分布的统计量。下同。

明显;R10、CDD、SDII、PRCPTOT 和 NW 呈上升趋势,其中 NW 增加趋势较明显,为 0.21 d·(10a)$^{-1}$。

极端降水指数年际波动特征明显。CDD 在 1961—1984 年多数值高于平均值;R95 在 1990—1998 年多数值高于平均值,2005—2011 年多数值低于平均值;Rx1day 在 1984—1998 年多数值高于平均值;PRCPTOT 在 1984—1998 年多数值高于平均值,1999—2011 年多数值低于平均值;Rx5day 在东部和西部地区 1999—2010 年多数值高于平均值,而中部地区 1999—2010 年多数值低于平均值;NW 在东部和中部地区 1999—2011 年多数值低于平均值,而西部地区高低不同。

3.2　极端降水指数空间变化特征

研究区 100 个气象站点极端降水指数空间趋势统计结果显示,R10、CWD、R95、Rx1day、SDII 和 PRCPTOT 呈增加趋势的站点所占比例高于呈减少趋势的站点,其中 SDII 和 PRCPTOT 呈增加趋势的站点分别占全部站点的 49%(显著增加占 6%)和 58%(显著增加占 4%),呈减少趋势的站点分别占 32%(显著减少占 2%)和 42%(显著减少 1%),增减趋势相差较大。CDD、Rx5day 和 NW 呈减少趋势的站点所占比例高于呈增加趋势的站点,其中 CDD 呈减少趋势的站点占全部站点的 66%(显著减少占 18%),而呈增加趋势的站点仅占 28%(显著增加占 3%),增减趋势差距最大,详见表 4。

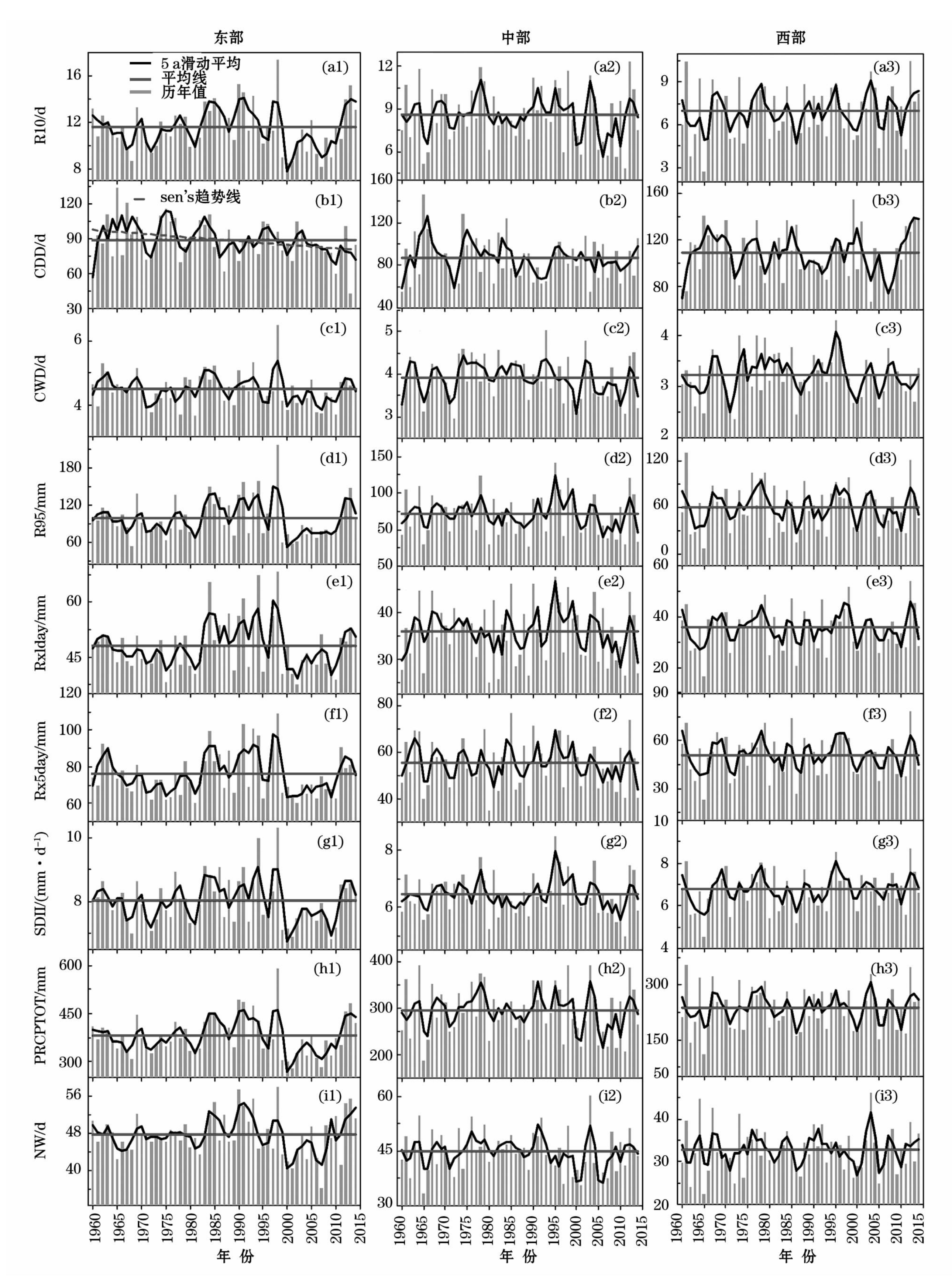
图 4 显示,强降水日数(R10)年平均值为 0.54~15.73 d,自东向西减少,总体上多数站点变化趋势不明显。R10 呈下降趋势的站点主要分布于呼伦贝尔市西部、兴安盟、通辽市、赤峰市西部、锡林郭勒盟西部以及乌兰察布市南部;R10 呈上升趋势的站点主要分布于内蒙古西部及其呼伦贝尔市东部和赤峰市中部,其中临河市、杭锦后旗、巴彦诺尔公苏木、清水河县和杭锦旗 5 个站点的 R10 呈显著增加趋势(图 4a)。

持续干燥指数(CDD)年平均值为 54.87~209.5 d,在西部地区较大,东部和中部地区次之,东北部地区最小。CDD 呈下降趋势的站点主要分布于内蒙古东部、中部以及包头市和呼和浩特市,其中牙克石市、鄂温克族自治旗、四子王旗、新巴尔虎左旗、达茂旗、莫力达瓦达斡尔族自治旗、乌兰浩特市等 18 个站点的 CDD 呈显著减少趋势;CDD 呈上升趋势的站点主要分布于巴彦诺尔市、阿拉善盟和鄂尔多斯市,其中临河市、额济纳旗和杭锦后旗 3 个站点的 CDD 呈显著增加趋势(图 4b)。

持续湿润指数(CWD)年平均值为 1.70~5.98 d,自东向西减少,总体上多数站点变化趋势不明显。CWD 呈上升趋势的站点分布于巴彦淖尔市和鄂尔多斯市,临河市和杭锦后旗 2 个站点的 CWD 呈显著增加趋势(图 4c)。

强降水量(R95)年平均值为 6.77~141.24 mm,自东向西减少。R95 呈上升趋势的站点主要分布于呼伦贝尔市、包头市、巴彦诺尔市、阿拉善盟、赤峰市南部和锡林郭勒盟东部,其中杭锦后旗、巴彦诺尔公苏木、临河市和鄂伦春自治旗 4 个站点的 R95 呈显著增加趋势;R95 呈下降趋势的站点主要分布于兴安盟、通辽市、乌兰察布市、呼和浩特市、赤峰市北部和锡林郭勒盟西部,其中舍伯吐镇和高力板镇 2 个站点的 R95 呈显著减少趋势(图 4d)。

单日最大降水量(Rx1day)年平均值为 10.35~57.86 mm,自东向西减少。Rx1day 呈下降趋势的站点主要分布于内蒙古东部、中部以及鄂尔多斯市,其中高力板镇、舍伯吐镇和宝国吐苏木 3 个站点的 Rx1day 呈显著减少趋势;Rx1day 呈上升趋势的站点主要分布于包头市、呼和浩特市、巴彦诺尔市和阿拉善盟,其中杭锦后旗、临河市、阿拉善右旗和巴彦诺尔公苏木 4 个站点的 Rx1day 呈显著增加趋势(图 4e)。



注:R10 为强降水日数,CDD 为持续干燥指数,CWD 为持续湿润指数,R95 为强降水量,Rx1day 为单日最大降水量,Rx5day 为 5 d 最大降水量,SDII 为普通日降水强度,PRCPTOT 为年总降水量,NW 为潮湿日数;图 b1 灰色虚线为显著变化趋势线。

图 3　内蒙古东中西部极端降水指数年际变化

Fig. 3　Interannual variation of extreme precipitation indices in the eastern, central and western parts of Inner Mongolia

表 3 内蒙古东中西部极端降水指数统计值

Tab. 3 Statistic results of extreme precipitation indices in the eastern, central and western parts of Inner Mongolia

		R10/d	CDD/d	CWD/d	R95/mm	Rx1day/mm	Rx5day /mm	SDII /(mm·d^{-1})	PRCPTOT /mm	NW/d
东部	β 值	-0.05	-3.17	-0.05	-1.48	-0.07	-0.31	-0.03	-1.79	0.02
	Z_{M-K}值	-0.33	-2.26	-1.07	-0.62	-0.17	-0.31	-0.54	-0.35	0.06
中部	β 值	-0.09	-1.46	-0.05	-0.98	-0.08	-0.53	-0.02	-3.34	-0.87
	Z_{M-K}值	-0.36	-0.75	-0.97	-0.46	-0.16	-0.58	-0.21	-0.61	-0.44
西部	β 值	0.11	0.03	-0.01	-0.22	-0.11	-0.12	0.06	0.18	0.21
	Z_{M-K}值	0.61	0.01	-0.33	-0.01	-0.10	-0.16	0.68	0.04	0.38

表 4 1960—2014 年内蒙古极端降水指数变化趋势统计

Tab. 4 Trends of extreme precipitation indices in Inner Mongolia during the period of 1960－2014

指数	增加趋势站点占总数比例/%			减少趋势站点占总数比例/%			没有变化站点占总数比例/%
	增加	显著增加	不显著增加	增加	显著增加	不显著增加	
R10	24	5	19	11	0	11	65
CDD	28	3	25	66	18	48	6
CWD	2	2	0	0	0	0	98
R95	36	4	32	32	2	30	32
Rx1day	51	4	47	49	3	46	0
Rx5day	49	7	42	51	2	49	0
SDII	49	6	43	32	2	30	19
PRCPTOT	58	4	54	42	1	41	0
NW	27	1	26	37	1	36	36

5 d 最大降水量(Rx5day)年平均值为 13.48～97.59 mm,自东向西减少。Rx5day 呈上升趋势的站点主要分布于内蒙古东北部、西部以及赤峰市和锡林郭勒盟东部,其中临河市、杭锦后旗、东乌珠穆沁旗、鄂伦春自治旗、阿拉善右旗、巴彦诺尔公苏木和赤峰市 7 个站点的 Rx5day 呈显著增加趋势;Rx5day 呈下降趋势的站点主要分布于内蒙古东部以及锡林郭勒盟西部和乌兰察布市,其中高力板镇和舍伯吐镇 2 个站点的 Rx5day 呈显著减少趋势(图 4f)。

普通日降水强度(SDII)年平均值为 4.12～8.98 mm·d^{-1},在东部地区较大,中部和西部偏东地区次之,西部偏西地区最小。SDII 呈上升趋势的站点主要分布于内蒙古西部与呼伦贝尔市东部、赤峰市北部及南部和乌兰察布市东南部,其中临河市、杭锦后旗、巴彦诺尔公苏木、阿拉善右旗、鄂伦春自治旗和赤峰市 6 个站点的 SDII 呈显著增加趋势;SDII 呈下降趋势的站点主要分布于呼伦贝尔市西部、兴安盟、通辽市、锡林郭勒盟、赤峰市中部和乌兰察布市西南部,其中新巴尔虎右旗和高力板镇 2 个站点的 SDII 呈显著减少趋势(图 4g)。

年总降水量(PRCPTOT)年平均值为 31.24～516.21 mm,自东向西减少。PRCPTOT 呈上升趋势的站点主要分布于内蒙古东北部和西部,其中鄂伦春自治旗、杭锦后旗、临河市和巴彦诺尔公苏木 4 个站点的 PRCPTOT 呈显著增加趋势;PRCPTOT 呈下降趋势的站点主要分布于内蒙古东部和中部地区,其中仅有高力板镇站点的 PRCPTOT 呈显著减少趋势(图 4h)。

潮湿日数(NW)年平均值为 7.93～67.41 d,自东向西减少。NW 呈减少趋势的站点明显多于增加趋势的站点,且聚集在内蒙古东部和中部地区,其中仅林西站的 NW 呈显著减少趋势;NW 呈上升趋势的站点主要分布于内蒙古东北部及包头市、呼和浩特市和巴彦诺尔市,其中新巴尔虎左旗站点的 NW 呈显著增加趋势(图 4i)。总体上,各极端降水指数变化趋势空间分布差异较大,呈下降趋势的站点主要分布于内蒙古东部和中部地区,而呈上升趋势的站点主要分布于东北部和西部地区。

4 结 论

(1) 时间变化上,研究区区域平均的9个极端

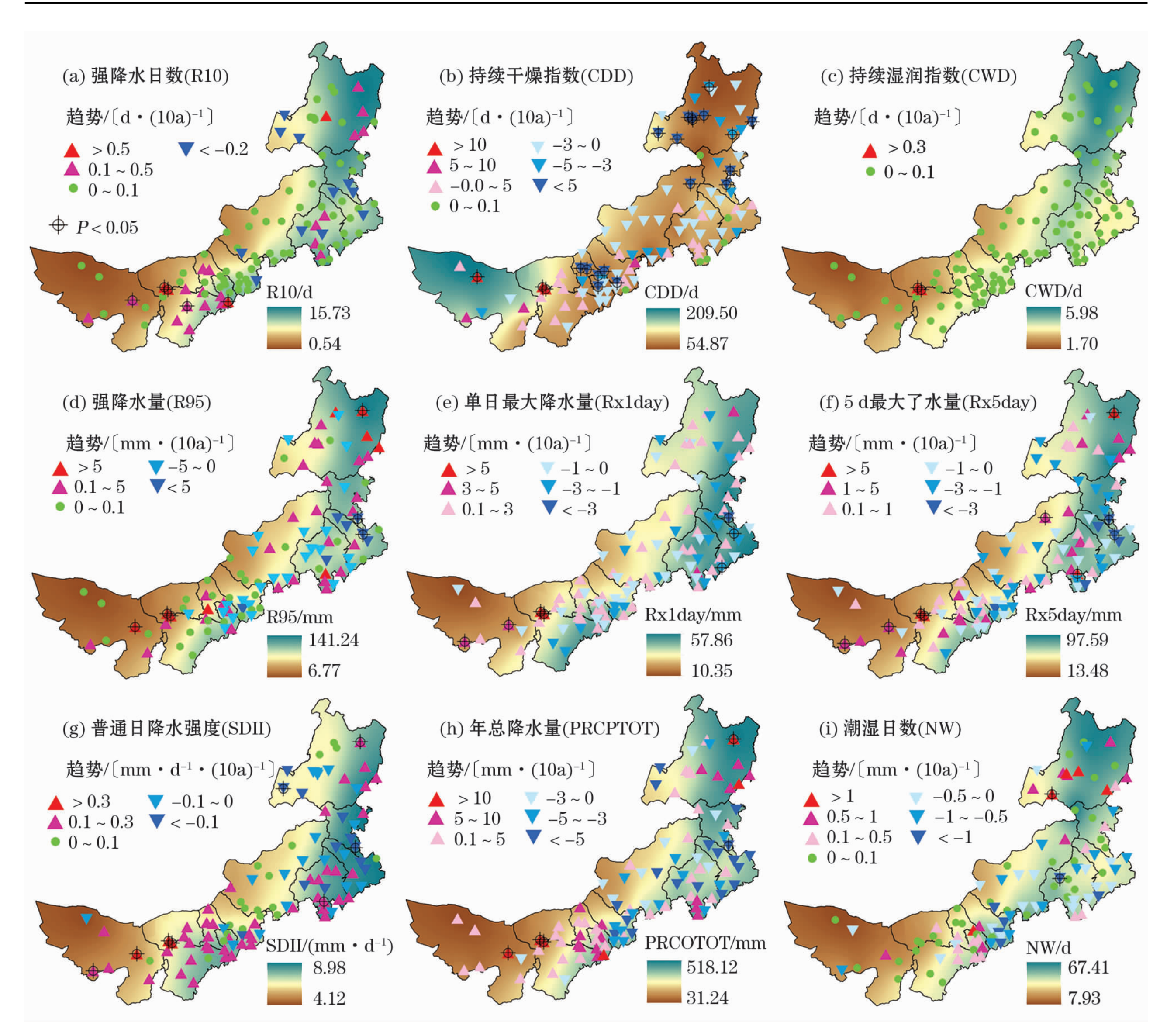


图 4　1960—2014 年内蒙古极端降水指数变化趋势空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of the change trend of extreme precipitation indices in Inner Mongolia during the period of 1960 – 2014

降水指数均呈不同程度的下降趋势,且年际波动特征显著;内蒙古东中西部年际趋势也有所差异,即东部地区 NW 增加,其余极端降水指数均减少,其中 CDD 呈显著下降趋势($P<0.05$);内蒙古中部地区所有极端降水指数均呈下降趋势,其中 PRCPTOT 下降趋势较明显;西部地区 CWD、R95、Rx1day、Rx5day 呈下降趋势,其余指数均呈增加趋势。

(2) 从空间变化特征来看,CDD 年平均趋势自西向东减少,其余指数年平均趋势均自东向西减少。R10、CWD、R95、Rx1day、SDII 和 PRCPTOT 上升趋势站点所占比例高于下降趋势站点,CDD、Rx5day 和 NW 与此相反。极端降水指数区域空间分布差异明显,呈下降趋势的站点主要分布于内蒙古东部和中部地区,而呈上升趋势的站点主要分布于东北部和西部地区。

5　讨论

研究发现,1960—2014 年内蒙古东部地区 CDD 呈显著下降趋势,而其他极端降水指数增减趋势不显著,说明其有效降水的间隔在缩小,降低了该地区极端干旱发生的可能性。而除 CDD 以外所有极端降水指数 2000 年以来增加较明显,说明近十几年来东部地区降水量增加。中部地区大部分极端降水指数 1995 年以来减少趋势较明显,表明中部地区近 20 a 来降水量减少。西部地区大部

分极端降水指数 1986 年以来增加趋势较明显，表明西部地区近 30 a 降水量有所增加。从站点变化趋势来看，CDD 呈减少趋势的站点远多于增加趋势的站点，指示大部分地区干旱现象在减少。临河市、杭锦后旗、巴彦诺尔公苏木和鄂伦春自治旗 4 个站点大部分极端降水指数显著增加，说明其强降水和暴雨发生可能性较大。而高力板镇和舍伯吐镇 2 个站点大部分极端降水指数显著减少，表明干旱发生可能性较大。极端降水空间分布差异较大，内蒙古东部和中部地区具有下降趋势，而东北部和西部地区具有上升趋势。这与李玮等[7]、尤莉等[15]的内蒙古极端降水减少且空间分布差异明显的研究结果较一致，但与刘俊英等[10]、刘宏伟等[13]的极端降水呈增加趋势有略微差异，主要与研究区极端降水指数东中西特征差异有关，前人研究并未对内蒙古地区进行分区研究，其次与研究时间尺度的不同有关。

1990—2011 年内蒙古地区极端干旱强度较大，连续时间较长[27]。本研究得出此时间段极端降水指数下降趋势明显，特别是内蒙古东部地区下降显著。研究区其他个别时段也出现极端干旱，如，20 世纪 60 年代末、20 世纪 70 年代初、20 世纪 80 年代初等[27]，这些时段极端降水指数也出现较低值，其中内蒙古中部地区极端降水指数明显低于东部和西部地区。此外，1997 年内蒙古西部地区出现严重干旱，此时西部地区极端降水指数也明显低于其他地区。内蒙古东部地区属于半湿润半干旱气候，主要受东亚季风影响，而西部地区位于季风区边缘，主要受西风带控制。此外，厄尔尼诺、拉尼娜、南方涛动等对研究区西部和中部降水具有重要影响[28]。中度厄尔尼诺事件可能会增加持续干旱日数的概率，强烈的厄尔尼诺事件将减少极端降水发生的可能性，而拉尼娜事件的发生可能会增加强降雨的风险[29]。极端降水事件会带来持续干旱、暴雨或洪涝灾害[2-4]，进而对生态环境、人类健康及农牧业生产造成严重影响[8-9]。如，在内蒙古地区，夏季降水决定植被覆盖度的高低，夏季出现干旱现象会对区域生态发展带来很大的负面影响[27]；内蒙古中部和西部地区玉米产量对降水变化较敏感，而限制玉米产量的主要降水因子是中等降水日数[30]。因此，进一步结合环流、地形、气温等数据对极端降水变化原因及影响进行详细分析与深入讨论，对内蒙古地区极端降水事件的研究具有重要意义。

参考文献(References)：

〔1〕 慈晖，张强，张江辉，等. 1961—2010 年新疆极端降水过程时空特征〔J〕. 地理研究，2014，33(10)：1 881 – 1 891. 〔Ci Hui，Zhang Qiang，Zhang Jianghui，et al. Spatiotemporal variations of extreme precipitation events within Xinjiang during 1961 – 2010〔J〕. Geographical Research，2014，33(10)：1 881 – 1 891.〕

〔2〕 梁丰，刘丹丹，王婉昭，等. 1961—2013 年东北地区夏季极端降水事件变化特征〔J〕. 干旱区地理，2016，39(3)：565 – 572. 〔Liang Feng，Liu Dandan，Wang Wanzhao，et al. Temporal and spatial variability of summer extreme precipitation events in Northeast China during 1961 – 2013〔J〕. Arid Land Geography，2016，39(3)：565 – 572.〕

〔3〕 顾西辉，张强，孔冬冬. 中国极端降水事件时空特征及其对夏季温度响应〔J〕. 地理学报，2016，71(5)：718 – 730. 〔Gu Xihui，Zhang Qiang，Kong Dongdong. Spatiotemporal patterns of extreme precipitation with their responses to summer temperature〔J〕. Acta Geographica Sinica，2016，71(5)：718 – 730.〕

〔4〕 王炳钦，江源，董满宇，等. 1961—2010 年北方半干旱区极端降水时空变化〔J〕. 干旱区研究，2016，33(5)：913 – 920. 〔Wang Bingqin，Jiang Yuan，Dong Manyu，et al. Spatiotemporal variations of extreme precipitation in the semiarid region in North China during the period of 1961 – 2010〔J〕. Arid Zone Research，2016，33(5)：913 – 920.〕

〔5〕 秦福莹，贾根锁，杨劼，等. 基于 TRMM 卫星数据的蒙古高原降水精度评估与季节分布特征〔J〕. 干旱区研究，2018，35(2)：395 – 403. 〔Qin Fuying，Jia Gensuo，Yang Jie，et al. Accuracy evaluation and seasonal distribution of precipitation over the Mongolian Plateau based on TRMM data〔J〕. Arid Zone Research，2018，35(2)：395 – 403.〕

〔6〕 陈建宇，赵景波. 1960—2014 年内蒙古极端天气事件趋势分析〔J〕. 干旱区研究，2017，34(5)：997 – 1 009. 〔Chen Jianyu，Zhao Jingbo. Trends of extreme weather events in Inner Mongolia during the period of 1960 – 2014〔J〕. Arid Zone Research，2017，34(5)：997 – 1 009.〕

〔7〕 李玮，段利民，刘廷玺，等. 1961—2015 年内蒙古高原内陆河东部流域极端降水时空变化特征分析〔J〕. 资源科学，2017，39(11)：2 153 – 2 165. 〔Li Wei，Duan Limin，Liu Tingxi，et al. Spatio-temporal variations of extreme precipitation from 1961 to 2015 in the eastern inland river basin of Inner Mongolian Plateau〔J〕. Resources Science，2017，39(11)：2 153 – 2 165.〕

〔8〕 李喜仓，王冀，杨晶. 内蒙古东部牧区极端降雪变化特征及其成因〔J〕. 地理科学，2013，33(7)：884 – 889. 〔Li Xicang，Wang Ji，Yang Jing. Characteristics and mechanism analysis of extreme snow change in eastern Inner Mongolia pasturing area〔J〕. Scientia Geographica Sinica，2013，33(7)：884 – 889.〕

〔9〕 白美兰，郝润全，邸瑞琦，等. 内蒙古东部近 54 年气候变化对生态环境演变的影响〔J〕. 气象，2006，32(6)：31 – 36. 〔Bai

Meilan, Hao Runquan, Di Ruiqi, et al. Effects of climatic changes in eastern Inner Mongoliaon eco-environmental evolution in last 54 years〔J〕. Meteorological Monthly, 2006, 32(6):31－36.〕

〔10〕刘俊英,刘华民,王炜,等. 内蒙古地区近四十年极端天气气候事件变化研究〔J〕. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2015, 46(4):400－408.〔Liu Junying, Liu Huamin, Wang Wei, et al. Study of extreme daily temperature and precipitation in recent forty years of Inner Mongolia〔J〕. Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition), 2015, 46(4):400－408.〕

〔11〕白美兰,郝润全,李喜仓,等. 1961—2010 年内蒙古地区极端气候事件变化特征〔J〕. 干旱气象, 2014, 32(2):189－193.〔Bai Meilan, Hao Runquan, Li Xicang, et al. Variable characteristics of extreme climate events during 1961－2010 in Inner Mongolia〔J〕. Journal of Arid Meteorology, 2014, 32(2):189－193.〕

〔12〕闫慧敏,陈伟娜,杨方兴,等. 过去 50 年内蒙古极端气候事件时空格局特征〔J〕. 地理研究, 2014, 33(1):13－22.〔Yan Huimin, Chen Weina, Yang Fangxing, et al. The spatial and temporal analysis of extreme climatic events in Inner Mongolia during the past 50 years〔J〕. Geographical Research, 2014, 33(1):13－22.〕

〔13〕刘宏伟,刘秀荣,陈凌云. 内蒙古地区极端降水事件分布特征〔J〕. 内蒙古气象, 2009(6):7－9.〔Liu Hongwei, Liu Xiurong, Chen Lingyun. The distribution characteristics of extreme precipitation events in Inner Mongolia〔J〕. Meteorology Journal of Inner Mongolia, 2009(6):7－9.〕

〔14〕刘俊英. 内蒙古地区近 43 年极端天气气候事件变化研究〔D〕. 呼和浩特:内蒙古大学, 2014.〔Liu Junying. The Study on the Changes of Extreme Climate Events in Recent Forty-Three Years in Inner Mongolia〔D〕. Hohhot:Inner Mongolia University, 2014.〕

〔15〕尤莉,戴新刚,张宇. 1961—2008 年内蒙古降水极端事件分析〔J〕. 气候变化研究进展, 2010, 6(6):411－416.〔You Li, Dai Xingang, Zhang Yu. Extreme precipitation events in Inner Mongolia in 1961－2008〔J〕. Advances in Climate Change Research, 2010, 6(6):411－416.〕

〔16〕郭明霞,杨晶,孟玉婧,等. 1961—2013 年内蒙古地区极端降水时空变化分析〔J〕. 内蒙古气象, 2015(1):18－20.〔Guo Mingxia, Yang Jing, Meng Yujing, et al. Analysis on the temporal and spatial change of extreme precipitation in Inner Mongolia from 1961 to 2013〔J〕. Meteorology Journal of Inner Mongolia, 2015(1):18－20.〕

〔17〕宋桂英,李孝泽,江靖,等. 2013 年夏季内蒙古干旱－半干旱区两次极端降水事件对比〔J〕. 干旱区研究, 2016, 33(4):747－757.〔Song Guiying, Li Xiaoze, Jiang Jing, et al. Two extreme rainstorms in the arid-semiarid zone of Inner Mongolia in summer 2013〔J〕. Arid Zone Research, 2016, 33(4):747－757.〕

〔18〕宋桂英,李孝泽,孙永刚,等. 内蒙古干旱—半干旱带 2012 年"7·20"极端暴雨事件的特征及成因〔J〕. 冰川冻土, 2013, 35(4):883－891.〔Song Guiying, Li Xiaoze, Sun Yonggang, et al. Characteristics and causes of the extreme rainstorm July 20, 2012 in the arid and semiarid zone in Inner Mongolia〔J〕. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(4):883－891.〕

〔19〕白美兰,郝润全,高建峰,等. 内蒙古地区极端气候事件分布特征及对农业影响评估〔J〕. 干旱地区农业研究, 2009, 27(2):21－27.〔Bai Meilan, Hao Runquan, Gao Jianfeng, et al. Distribution character of extreme climatic events and evaluation of its influence on agriculture in Inner Mongolia〔J〕. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(2):21－27.〕

〔20〕康晓明,崔丽娟,郝彦宾,等. 极端干旱对内蒙古羊草草原水分平衡的影响〔J〕. 应用与环境生物学报, 2015, 21(4):700－709.〔Kang Xiaoming, Cui Lijuan, Hao Yanbin, et al. Effects of extreme drought on the water balance of a *Leymus chinensis* steppe in Inner Mongolia, China〔J〕. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2015, 21(4):700－709.〕

〔21〕杨丽萍,冯旭宇,闫伟兄,等. 极端气温变化对内蒙古地区榆树物候期的影响〔J〕. 气象与环境学报, 2017, 33(5):97－102.〔Yang Liping, Feng Xuyu, Yan Weixiong, et al. Influence of extreme temperatures change on *Ulmus pumila* phenophase in Inner Mongolia area〔J〕. Journal of Meteorology And Environment, 2017, 33(5):97－102.〕

〔22〕杨方兴. 内蒙古地区极端气候事件时空变化及其与 NDVI 的相关性〔D〕. 西安:长安大学, 2012.〔Yang Fangxing. Trends of Extreme Daily Precipitation and Temperature and the Correlation with NDVI in Inner Mongolia〔D〕. Xi'an:Chang'an University, 2012.〕

〔23〕中国气象局预测减灾司,中国气象局国家气象中心. 中国气象地理区划手册〔M〕. 北京:气象出版社, 2006:14－15.〔China Meteorological Administration Forecast Disaster Reduction Division, National Meteorological Center of China Meteorological Administration. China Meteorological Geography Division Manual〔M〕. Beijing:Meteorological Press, 2006:14－15.〕

〔24〕Zhang J S, Shen X J, Wang B L. Changes in precipitation extremes in Southeastern Tibet, China〔J〕. Quaternary International, 2015, 380(2):49－59.

〔25〕Yue S, Pilon P, Cavadias G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series〔J〕. Journal of Hydrology, 2002, 259(1/4):254－271.

〔26〕康淑媛,张勃,柳景峰,等. 基于 Mann-Kendall 法的张掖市降水量时空分布规律分析〔J〕. 资源科学, 2009, 31(3):501－508.〔Kang Shuyuan, Zhang Bo, Liu Jingfeng, et al. Analysis of the spatiotemporal distribution of precipitation in Zhangye City using Mann-Kendall method〔J〕. Resources Science, 2009, 31(3):501－508.〕

〔27〕Liu S L, Kang W P, Wang T. Drought variability in Inner Mongolia of Northern China during 1960－2013 based on standardized precipitation evapotranspiration index〔J〕. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(2):1－14.

〔28〕Huang J, Sun S L, Xue Y, et al. Changing characteristics of precipitation during 1960－2012 in Inner Mongolia, Northern China〔J〕. Meteorology and Atmospheric Physics, 2015, 127(3):257－271.

〔29〕Li W, Duan L M, Luo Y Y, et al. Spatiotemporal characteristics of extreme precipitation regimes in the eastern inland river basin of Inner Mongolian Plateau, China〔J〕. Water, 2018, 10:1－16.

〔30〕 Huang J, Chen X, Zhou L M, et al. Statistical analysis of the relationship between climate-induced maize yield and rainy-season precipitation across Inner Mongolia, North China〔J〕. Theoretical and Applied Climatology, 2017, 129(3/4): 1 145 – 1 156.

Spatiotemporal Variation of Extreme Precipitation Indices in Inner Mongolia in Recent 55 Years

CHUN Lan[1], QIN Fu-ying[1], BAO Lu[2], NA Yin-tai[3], BAO Yu-hai[1], BAO Shan-hu[1]

(1. *College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot* 010022, *Inner Mongolia, China*;
2. *Inner Mongolia Development Research Center, Hohhot* 010098, *Inner Mongolia, China*;
3. *College of Resources and Environment, Inner Mongolia University of Finance and Economics, Hohhot* 010022, *Inner Mongolia, China*)

Abstract: Nine extreme precipitation indices recommended by the Climate Change Monitoring and Index Expert Group (ETCCDI) were selected. The Sen's slope, the Mann-Kendall nonparametric statistical test and Geostatistical Analyst methods were used to study the spatiotemporal variation of these indices based on the daily precipitation data from 100 meteorological stations in Inner Mongolia from 1960 to 2014. The results showed that the average extreme precipitation indices of the study area were in a decrease trend in varying degrees, and their interannual fluctuations were significant. Their interannual trends in the subareas were different, that is, in the eastern area, the wet days (NW) was in an increase trend, and other indices were in a decrease trend, among which the continuous drying index (CDD) was in a significant decrease trend ($P < 0.05$); in the central area, all the extreme precipitation indices were in a decrease trend, and the reduction of total annual precipitation was more obvious; in the western area, the continuous wetness index (CWD), heavy precipitation (R95), monthly maximum 1 – day precipitation (Rx1day), and monthly maximum consecutive 5 – day precipitation (Rx5day) were in a decrease trend, and other indices were in an increase trend. Viewing from the spatial distribution of the change trend of extreme precipitation indices, the regional difference was significant. The stations with a general decrease trend of these indices were mainly distributed in the eastern and central areas of Inner Mongolia, and those with an increase trend were mainly distributed in the northeastern and western parts of Inner Mongolia.

Key words: extreme precipitation; spatiotemporal distribution; Mann-Kendall test; change trend; Inner Mongolia